


# Bases

# des systèmes FRP de S&P

Reinforcing the Planet

# Table des matières







# 1. Introduction

Les structures porteuses (Acier, Béton, Bois) sont dimensionnées pour des sollicitations données et généralement exécutées conformément aux plans. Les hypothèses originales admises peuvent évoluer au cours de la vie de l'ouvrage, et cela pour diverses raisons dont:

- La modification de l'affectation de l'ouvrage
- L'altération des matériaux de construction
- La corrosion de l'armature interne
- Les séismes, incendies ou explosions
- La modification de normes sur les actions, les sécurités, etc…

Il est également possible de rectifier des erreurs de calcul ou de l'exécution.

Une parfaite connaissance et une évaluation complète de l'état existant, sont les conditions impératives pour élaborer un concept général de remise en conformité. Pour renforcer des éléments d'ouvrages en béton, il existe les possibilités suivantes:

- Adaptations dans la structure porteuse (nouveaux piliers, ajout de sommiers, etc.)
- Mise en place d'armatures supplémentaires (passives ou précontraintes)

**Pour le renforcement d'une structure porteuse existante, l'utilisation de matériaux composites à base de fibre (Fiber Reinforced Polymers, FRP) est bien adaptée.**



*Image 1: Lamelle S&P CFK*



*Image 2: S&P A-Sheet 120*



*Image 3: S&P C-Sheet*

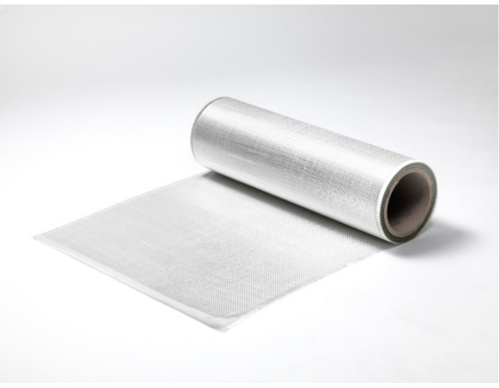


*Image 4: S&P G-Sheet*





# 2. Systèmes de renforcement FRP

L'acier d'armature et les matériaux composites à base de fibres ont des comportements mécaniques différents. Alors que l'acier se comporte de manière élastique-plastique, les systèmes FRP dans leur ensemble ont un comportement linéaire-élastique jusqu'à la rupture. Ceci doit être pris en compte dans le dimensionnement.

Les fibres utilisées dans les systèmes FRP sont noyées dans une matrice polymère. Elles peuvent être disposées aussi bien de manière unidirectionnelle que bidirectionnelle. Dans la construction, ces produits sont utilisés pour le renforcement d'éléments existants.

## 2.1 Lamelles S&P CFK

Les préfabriqués sont trempés en usine dans une matrice. Ils sont thermiquement durcis et livrés sur le chantier sous forme d'un composite FRP préfabriqué (lamelles).
Les lamelles *S&P CFK 150/2000 ou 200/2000* sont des produits laminés largement répandus pour le renforcement d'ouvrages existants. Ces deux types de lamelles se différencient par leur module d'élasticité et leur déformation à la rupture. S&P propose diverses largeurs et épaisseurs standards, en fonction des besoins.

## 2.2 S&P Sheets

### 2.2.1 Tissu (direction unidirectionnelle)

Lors de la fabrication des tissus, les fibres sont étirées longitudinalement (unidirectionnelle). Elles sont ainsi capables de reprendre des efforts immédiatement. Elles permettent de ce fait l'augmentation de la résistance à la traction flexionnelle et à l'effort tranchant d'éléments de construction.
Lors de la phase de production mécanisée, les fibres de renforcement sont collées sur une trame de support en polyester et sont conditionnées sous forme de rouleau en différentes largeurs et en différents grammages.

### 2.2.2 Tissu (direction bidirectionnelle)

Pour ces tissus, les fibres sont disposées dans les deux directions (bidirectionnelle) durant un processus de tissage. Ce mode de fabrication induit une légère ondulation des fibres. Les fibres de renforcement doivent être préalablement tendues avant qu'elles reprennent des efforts. En conséquence, les tissus sont idéalement utilisés pour augmenter la ductilité d'un élément de construction.

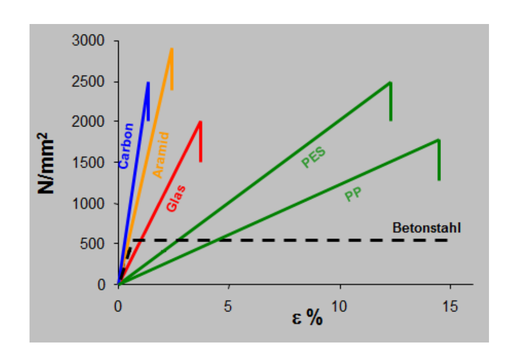
### 2.2.3 Matrice époxy

Une matrice en colle époxy durcie à froid est utilisée pour permettre le transfert des efforts d'un tissu dans la structure à renforcer.
En fonction du grammage, les tissus sont appliqués soit par voie sèche (dry lay up), soit par voie humides, c'est à dire après avoir été imprégnés (wet lay up). Pour le procédé par voie humide S&P a développé une machine d'imprégnation (wet lay up machine) afin d'assurer une pré-imprégnation idéale des Sheets d'un grammage plus lourd (épaisseur).





# 3. Fibres utilisées pour les systèmes FRP de S&P




| Type de fibre | Module d'élasticité kN/mm$^2$ | Résistance à la traction N/mm$^2$ |
|---|---|---|
| C **(Carbone)** | 240 – 640 | 2'650 – 4'500 |
| A **(Aramide)** | 120 | 2'900 |
| G **(Verre)** | 65 – 73 | 2'800 – 3'300 |
| PES / PP | $< 15$ | $> 1'800$ |
| *(Acier d'armature)* | *205* | *550* |

*Image 5: Courbe contrainte-allongement*

S&P produit des lamelles (pultrudées) ou des tissus constitués d'un seul type de fibres. Les caractéristiques principales de ces fibres sont données ci-dessous:

Les **fibres de carbone (C)** sont des fibres produites industriellement à partir de matériaux carbonés. Les fibres (filaments) sont enroulées pour former un fil. Les fils sont usinés pour finalement former les lamelles et les tissus. En combinant les fils à une matrice en résine époxy, on obtient un polymère renforcé de fibres de carbone, abrégé CFK. La résistance et la rigidité (module d'élasticité) des fibres de carbone sont élevées dans leur axe longitudinal. Les fibres de carbone sont résistantes à la corrosion et présentent une masse volumique très faible. Leur coefficient de dilatation dans la direction des fibres est négatif; elles se raccourcissent lorsqu'elles sont échauffées.

Les **fibres d'aramide (A)** sont des fibres synthétiques de couleur dorées. Ces fibres sont caractérisées par une très haute résistance, une haute résilience, un allongement à la rupture élevé, un bon amortissement des vibrations et un bon comportement en milieu acide et alcalin. Elles sont de plus très résistantes à la chaleur et au feu. Comme les fibres de carbone, les fibres d'aramide ont un coefficient de dilatation thermique négatif dans le sens longitudinal. Leur résistance ainsi que leur module d'élasticité sont sensiblement plus faibles que ceux des fibres de carbone. Sous leur forme finale, ces fibres sont réputées pratiquement indestructibles. Elles sont utilisées dans le domaine aérospatial, pour la fabrication d'habits de protection, pour la protections contre les explosions, etc.

Les **fibres de verres (G)** (de l'allemand Glas ou de de l'anglais Glass) sont de longues et fines fibres tirées de la fusion du verre. Ces fibres sont conditionnées en rouleaux pour la production de tissus. Elles ont une bonne résistance au vieillissement, aux actions climatiques et chimiques et sont incombustibles. Elles possèdent des propriétés mécaniques isotropes. Les fibres de verre se comportent de manière linéaire-élastique jusqu'à la rupture. La résistance élevée des fibres de verre est notamment due au fait que le verre présente moins de défauts par unité de longueur sous forme de fibres qu'en tant que matériau compact.
Verre AR (AR = Alcali-Résistant) : fibres développées pour une application dans le béton. Très résistantes vis-à-vis d'un environnement basique.
Verre E (E = Electrique): fibres standard pour les polymères renforcées en fibres de verre.

# 4. Bases techniques

Pour le renforcement de structures porteuses en béton armé ou précontraint à l'aide de lamelles S&P CFK ou de tissus S&P, l'ingénieur dispose des logiciels de dimensionnement *« FRP Lamella »* et *« FRP Colonna »*. Ces logiciels peuvent être utilisé tant pour la conception de dispositifs de renforcement que pour les vérifications statiques dans le cadre d'un dimensionnement. Les normes correspondantes aux pays s'appliquent. En Suisse, le dimensionnement s'effectue selon l'Eurocode 2 et la SIA 166.
En plus des propriétés des matériaux et des formules de calcul les plus importantes, des exemples de calculs sont disponibles dans le document « Base de dimensionnement ». L'utilisation des logiciels ainsi que les possibilités sur les données à saisir sont décrites en détail dans le mode d'emploi des logiciels.

Les modèles de dimensionnement et les logiciels *„FRP Lamella / FRP Colonna"* tiennent compte des caractéristiques spécifiques des systèmes de renforcement S&P ainsi que des colles correspondantes. Les longueurs d'ancrages sur lesquelles les logiciels sont basés ne sont plus valables lors du changement d'un des composants du système. Dans ces circonstances, le fournisseur des systèmes (S&P) déclinera toute responsabilité.

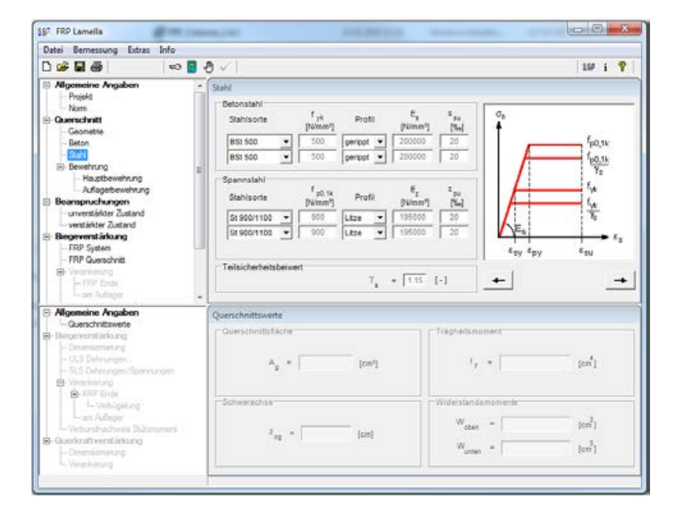



*Image 6: FRP Lamella*

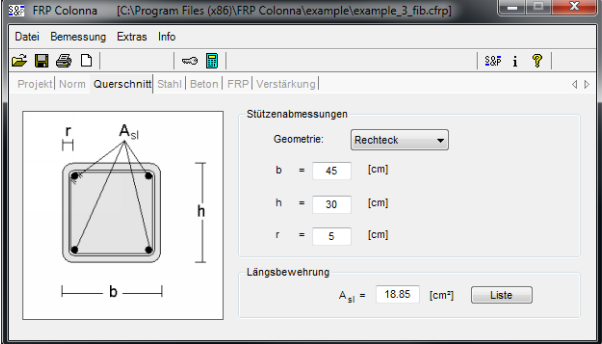



*Image 7: FRP Colonna*

**Ces logiciels peuvent être utilisés sans frais uniquement pour le dimensionnement des systèmes FRP de la société S&P. Toute autre utilisation de ces logiciels est soumise au paiement d'une taxe de licence à la société S&P Clever Reinforcement Company AG.**

S&P a souscrit une assurance responsabilité civile pour les services d'ingénierie.
L'utilisateur est responsable de l'exactitude des données servant au dimensionnement.

Dans le cadre d'études pour des projets, les ingénieurs et conseillers de vente de chez S&P sont à disposition pour apporter leur soutien, comme par exemple pour:

- elaboration / vérification concept de renforcement
- effectuer les vérifications statiques nécessaires
- fournir des dossiers d'appel d'offres
- toutes autres requêtes techniques





## 4.1 Principes et règles constructives pour le dimensionnement

Les **principes** suivants sont à respecter pour le dimensionnement selon la norme SIA 166 :

- Concept de sécurité structurale $E_d \leq R_d$
- Défaillance des armatures collées $E_d = E (G_k, P_k, A_d, \psi_{2i}Q_{ki}, X_d, a_d)$
- Déformation maximale des armatures collées sous flexion/traction $\varepsilon_{f,lim,d} \leq 8$ ‰ Valeur de calcul de la composante tangentielle de la contrainte longitudinale de $\varepsilon_{f,lim,d} = 2$ ‰ (éléments comprimées)
- Charge de rupture de l’interface non-linéaire sur la longueur d’ancrage
- Vérification de l’ancrage dans la zone théoriquement non-fissurée
- Ancrage de l’armature de flexion sur appui d’après un modèle de bielles et tirants (treillis)
- Vérification de la variation de la force de traction sur une distance de 200 mm
- Les armatures collées sur de la maçonnerie sont à ancrer dans des éléments en béton adjacents
- Les armatures de cisaillement (acier et CFK) reprennent l’effort tranchant
- Les systèmes FRP sont des éléments de traction
- Epaisseur des lamelles de 1 à 5 mm / largeur jusqu'à 200 mm

Recommandations et règles constructives pour le renforcement à l’aide de systèmes FRP S&P:

- Déchargement maximal de la structure avant le renforcement (déformations initiales minimales)
- Déformation maximale des *Lamelles S&P CFK* $\varepsilon_{f,lim,d}$ *:*
  - collées 6 - 8 ‰
  - fraisées 8 - 10 ‰
  - précontraintes 12 ‰ (précontrainte 4 – 6 ‰)
- Déformation maximale des S&P Sheets $\varepsilon_{f,lim,d}$ :
  - flexion 8 ‰
  - confinement de piliers 4 ‰
  - effort tranchant 2- 4 ‰
- Distance entre le bord des lamelles et le bord de l’élément en béton = enrobage des étriers dans le béton
- Entre-axe des lamelles $s_{f,max}$ = 0.2 x portée ou
  5 x épaisseur de la dalle
  0.4 x longueur du porte-à-faux ou
- Maximum 2 lamelles superposées l’une sur l’autre
- Maximum 5 couches de Sheets superposées l’une sur l’autre
- Profondeur maximale de fraisage : enrobage de l’armature moins 5 mm
- Largeur maximale de fraisage : 3mm de plus que l’épaisseur de la lamelle
- Entre-axe des lamelles fraisées $s_{f,min} \geq 32$ mm (plus gros granulat dans le béton) ou profondeur de fraisage plus largeur de fraisage
- Rayon de courbure des Sheets : au moins 25 mm
- Distance entre les couches de Sheets pour le renforcement à l’effort tranchant = maximum 0.8 x hauteur de l’élément de construction
- Epaisseur des lamelles de 1 à 5 mm / Largeur des lamelles jusqu’à 200 mm
- Protection incendie $\gamma_{Me,RC} \leq 1.0$
- Protéger les colles Epoxy contre les UV
- Protéger les systèmes FRP contre les dégâts mécaniques
- Respect des indications du fournisseur concernant le support et les produits





# 5. Systèmes FRP avec des Lamelles S&P CFK

Les lamelles sont préfabriquées en usine. Les fibres de carbone sont tendues et plongées en continu dans une matrice époxy durcie à chaud (pultrusion). Pour des raisons techniques liées au procédé de fabrication, la concentration maximale de fibres représente environ 70% du laminé. Les propriétés des fibres et celles de la matrice sont connues, il est donc théoriquement possible de déterminer le module d'élasticité d'une section unidirectionnelle (lamelle CFK). Les valeurs du module d'élasticité et de la résistance à la traction de la matrice sont négligeables en comparaison à celles du carbone. On peut donc admettre, pour les lamelles, que ces deux valeurs sont égales à 70% de celles de la fibre de carbone.

Alors qu'il faut utiliser les valeurs théoriques des fibres pour le calcul de tissus laminés à la main sur site, ce sont les caractéristiques effectives qui sont employées pour les lamelles CFK préfabriquées.



*Image 8: Montage d'une lamelle S&P CFK*

### *Lamelles S&P CFK*

Les caractéristiques effectives peuvent être employées pour le dimensionnement.

Les caractéristiques des lamelles sont contrôlées par S&P Reinforcement au moyen d'un concept d'assurance qualité selon ISO 9001. A la différence des tissus laminés à la main sur site, **aucun facteur de réduction du au mode de fabrication ne s'applique (γ = 1.0).**

Pour des projets spécifiques, S&P peut fabriquer sur demande des lamelles S&P CFK présentant un module d'élasticité plus élevé ou de plus grandes dimensions.

Les caractéristiques des *Lamelles S&P CFK* peuvent être obtenue dans les fiches de données techniques (www.sp-reinforcement.eu).

## 5.1 Lamelles S&P CFK collées en surface

Les *Lamelles S&P CFK* sont liées à la zone tendue de l'élément de construction fléchi au moyen de la résine époxy *S&P Resin 220* résistante au cisaillement. On obtient ainsi un tirant élastique-plastique (acier d'armature) et un tirant linéaire-élastique (*Lamelles S&P CFK*). Les équations permettant de calculer la résistance d'adhérence et les longueurs d'ancrage ont été formulées à partir des essais d'adhérence.





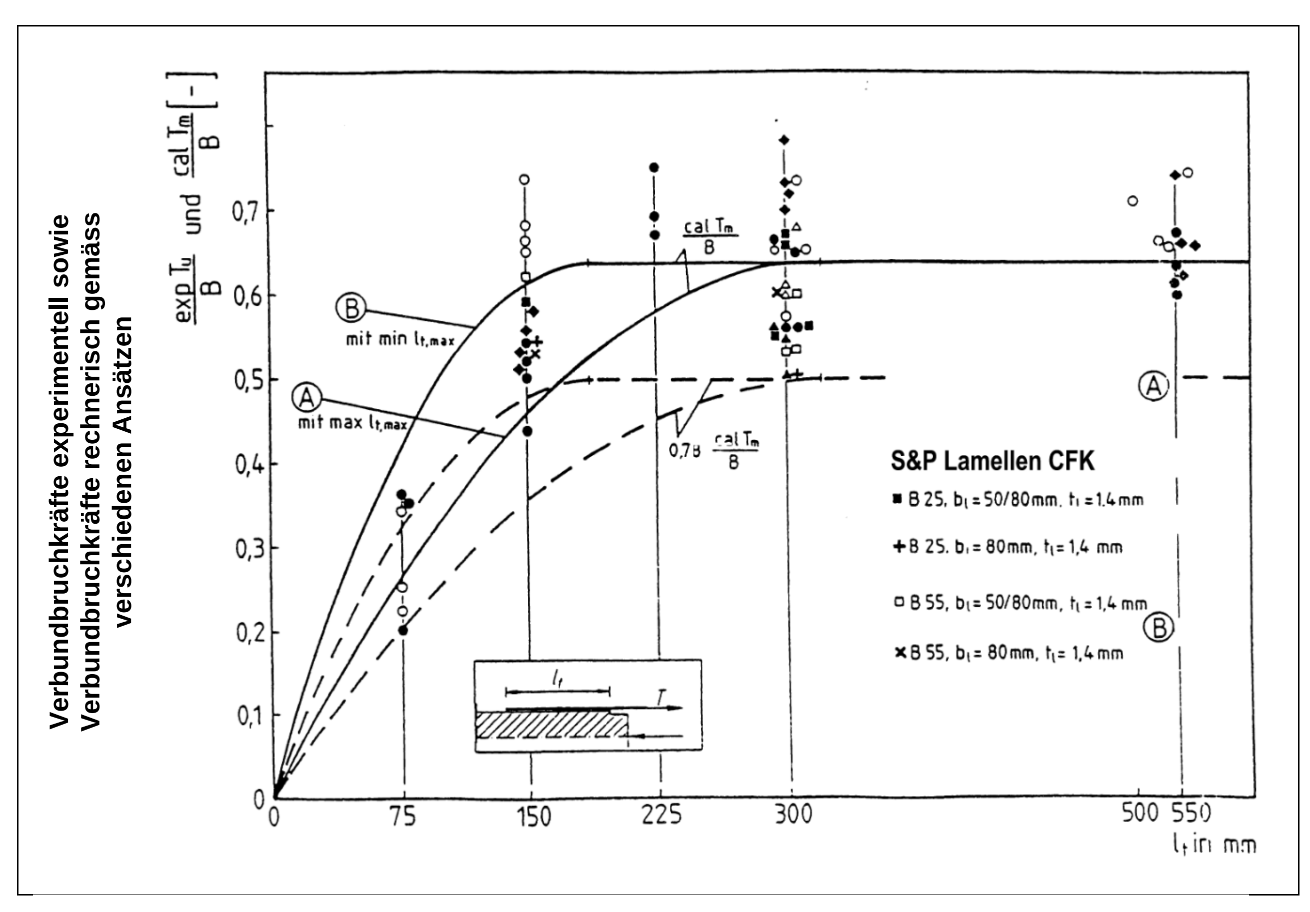



*Image 9: Résistance à la rupture de l'adhérence en fonction de la longueur d'ahérence des lamelles CFK (TU Braunschweig D)*

La force d'adhérence maximale est atteinte pour une longueur de *Lamelle S&P CFK* d'environ 300 mm. A partir de cette longueur d'ancrage, la force d'adhérence n'augmente plus.

**La force d'adhérence** maximale d'une ***Lamelle S&P CFK*** **collée** de 80 mm de largeur atteint **entre 35 et 40 kN** (sur un support en béton non-fissuré).

Le modèle admis pour l'ancrage d'une armature collée sur du béton se base fondamentalement sur la mécanique de fracture non linéaire qui est formulable pour des matériaux élastiques quelconques des lamelles.

Les forces d'adhérence sont à chaque fois introduites dans le support entre deux fissures de flexion ou d'effort tranchant. Pour un diagramme des moments de flexion positive (moment en travée) la vérification de l'ancrage se fait dans le béton non fissuré. La tension résiduelle doit être ancrée.Pour un moment de flexion négatif (moment sur appui), la lamelle est prolongée jusqu'au point des moments nuls et ensuite ancrée avec la longueur d'ancrage et la distance de décalage horizontal de la ligne des efforts de traction. Le logiciel „FRP Lamella“ développé par S&P effectue les vérifications correspondantes de l’ancrage pour les systèmes FRP S&P.

Dans le cadre de processus d’approbation des *Lamelles S&P CFK* en France, en Allemagne, en Angleterre, en Corée, etc., des lamelles ont été testées sur des poutres soumises à la flexion.

Des essais de flexion sur des dalles minces ont montré qu’un délaminage prématuré des lamelles CFK sans ancrages terminaux était déjà possible pour une déformation de 6 à 8 ‰. Pour cette raison, l’allongement maximal pour le dimensionnement de lamelles CFK a été fixé à 8 ‰ dans les normes et directives reconnues nationalement et internationalement.

**La valeur recommandée pour l’allongement maximal de dimensionnement (allongement limite : $\varepsilon_{f,lim,d}$ ) des *Lamelles S&P CFK* collées en surface est de 8 ‰, pour des éléments minces maximal 6 ‰.**





*Image 10 / 11 / 12: Lamelles S&P CFK collées en surface*

## 5.2 Ancrage d'extrémité des Lamelles S&P CFK collées en surface

Lorsque la pente des moments est abrupte près d'un appui ou lorsque plusieurs lamelles CFK doivent être collées les unes sur les autres, le dimensionnement montre souvent qu’il n'est pas possible d’ancrer uniquement par adhérence. Dans de telles situations, d'autres moyens d’ancrages aux extrémités de la lamelle sont nécessaires:

### A) Système d’ancrage

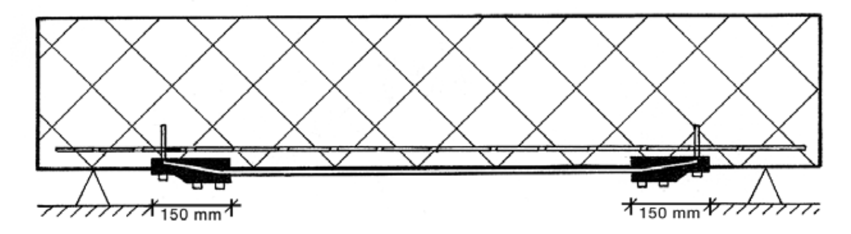



*Image 13: Système d’ancrage S&P breveté*

S&P a développé un système d’ancrage garantissant un transfert des efforts aux extrémités des lamelles et évitant ainsi le délaminage.
Les Lamelles S&P CFK sont pincées dans 2 sabots en aluminium aux extrémités de celle-ci. La pression sur les lamelles, le collage, ainsi que le rayon de celle-ci induit par la courbure des pièces en aluminimum garantissent l’ancrage.

## B) Essais avec ancrages terminaux S&P

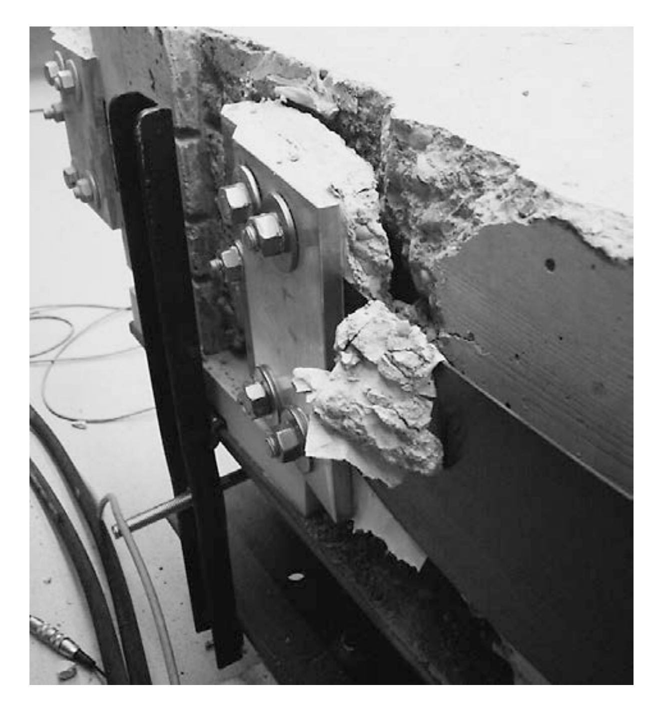


*Image 14: Ruine de béton*

Une série d'essais sur le système d'ancrage S&P a été menée au laboratoire de la construction de l'école d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg (EIA-FR). L'essai consiste à mettre en traction deux lamelles CFK collées uniquement au système d'ancrage, ce dernier étant scellé au béton. Trois différentes qualités de béton et trois dimensions de lamelles ont été testées. A chaque fois, la défaillance s'est produitee dans les blocs en béton non armés. Les charges de ruine obtenues sont par conséquent dépendantes de la qualité du béton et de la disposition des plaques d'ancrage.

La résistance des ancrages mécaniques pour une *Lamelle S&P CFK* de 80 mm de large est d'environ **150 kN**

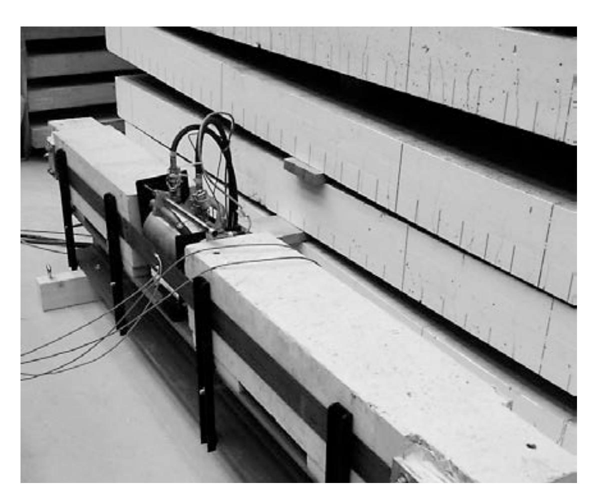


*Image 15: Essai effectué à L'EIA de Fribourg*

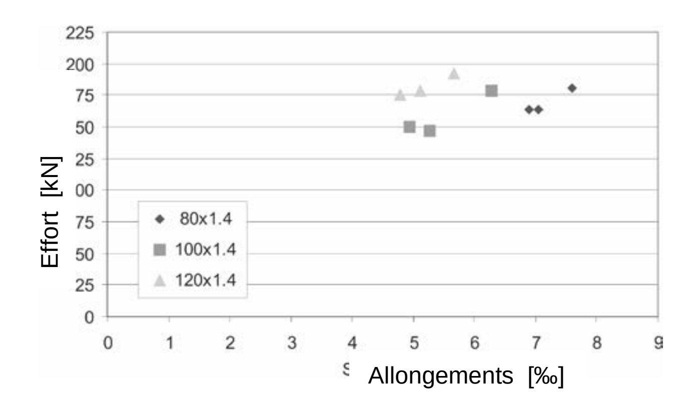



*Image 16: Résultat des essais*
*(pour béton de classe de résistance C20/25)*

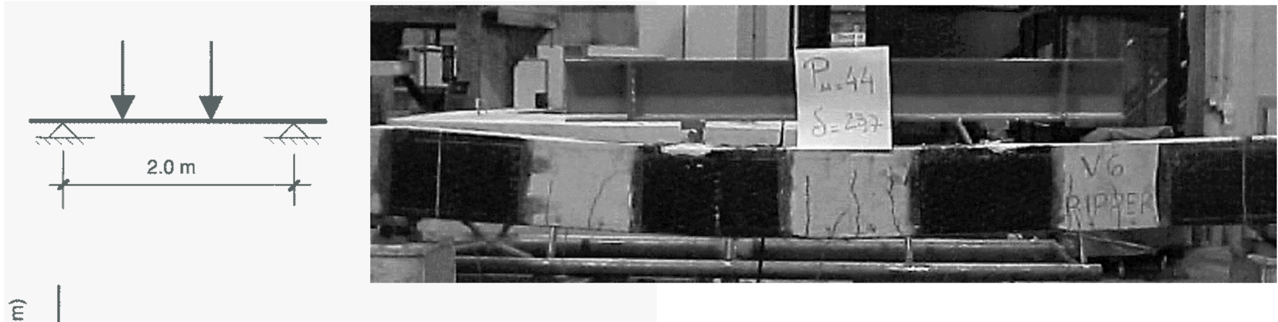
## C) Ancrage d'extrémité avec C-Sheet S&P 640

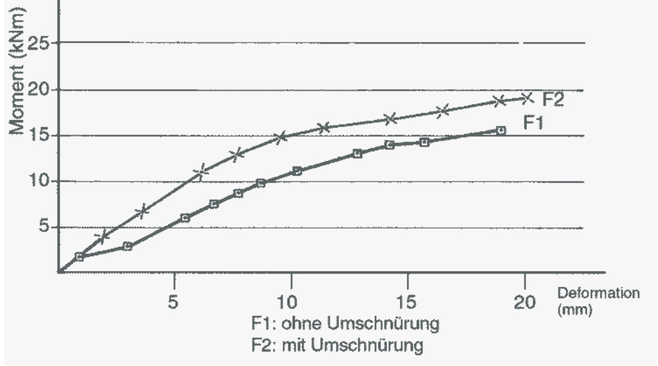
Les deux extrémités de la *Lamelle S&P CFK* sont ceinturées par un tissu *S&P C-Sheet 640*. Des essais sur ce sujet ont été effectués à l'Université de Lisbonne (P).





### Dispositif d'essai




Les essais montrent que le moment de ruine d'une poutre ceinturée peut être augmenté d'environ 20 %.

*Image 17: Recherches à l'Université de Lisbonne (PT)*





*Images 18 / 19: Lamelles ancrées aux extrémités, sous dalle et sous sommier*

## 5.3 Lamelles S&P CFK engravées

Les *Lamelles S&P CFK* 10/1.4 mm, 20/1.4 mm, 10/2.8 mm et 15/2.5 mm sont spécialement conçues pour être engravées dans le béton ou dans le bois.

En règle générale, une fente d'environ 5 à 8 mm de largeur pour 15 à 25 mm de profondeur est exécutée en surface à l'aide d'une scie circulaire. De la résine époxy (*S&P Resin 55 ou S&P Resin 220*) est coulée dans cette fente puis la lamelle est introduite de chant. Pour plus de détails, voir le manuel d'application S&P.

Le mode de fonctionnement des lamelles engravées a fait l'objet d'une étude détaillée à l'Université Technique de Munich (D), à l'Université Technique de Porto (PT) et à l'Université Technique Rolla (USA). Le comportement de la liaison avec le support béton a été testé par des essais d'adhérence. Ces essais ont démontré la robustesse de la liaison. La rupture n'est pas survenue, comme pour les lamelles collées, par un décalage vertical des fissures d'effort tranchant. **La résistance à la traction des lamelles a pu ainsi être totalement exploitée et ce jusqu'à la rupture des fibres de carbone.**

Plusieurs essais de flexion en trois points ont été menés à l'Université Technique Munich (D) sur des poutres en béton armé d'un entre axe des appuis de 2,5 m.

Chaque élément d'essai était muni soit d'une Lamelle S&P CFK 50/1.2mm collée en surface, soit de deux lamelles CFK 25/1.2mm engravées (section total équivalente à une lamelle de 50/1.2mm).

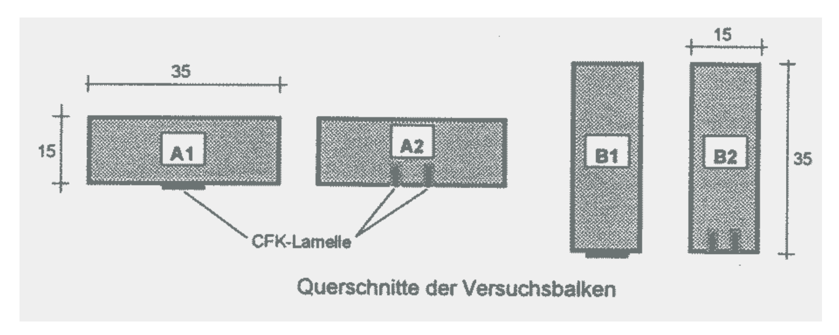



*Image 20: Section des poutres d'essai*

- La ruine des poutres A1 et B1 survient par un délaminage des lamelles CFK.
- La ruine de la poutre A2 survient par la rupture à la traction des lamelles engravées.
- La ruine de la poutre B2, faiblement armée à l'effort tranchant, résulte d'une rupture au cisaillement du béton.

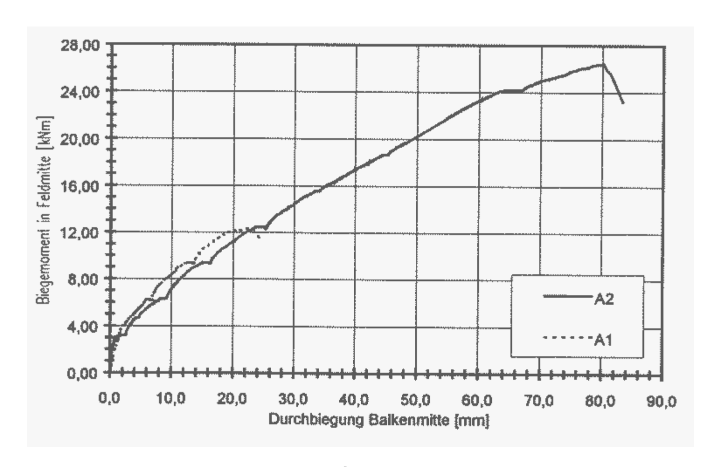



*Image 21: Courbe moment-déformation des essais A1 et A2*

**Interprétation des résultats pour les poutres A**

Pour une même rigidité, la charge de ruine est plus que doublée grâce à encastrement des lamelles. Cela est dû à la meilleure exploitation de la résistance à la traction des *Lamelles S&P CFK*.





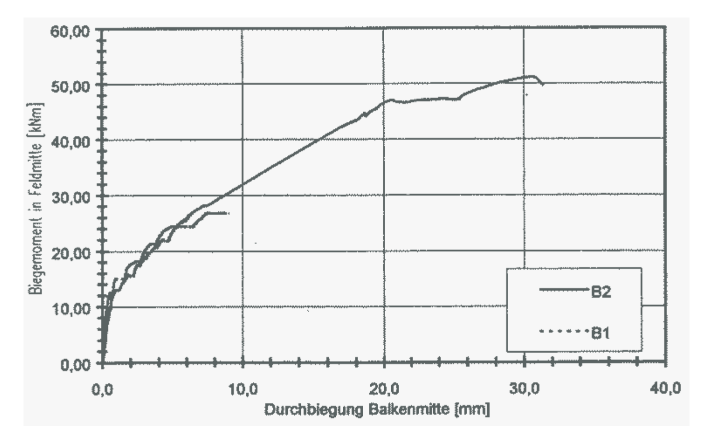



*Image 22: Courbe moment-déformation des essais B1 et B2*

**Interprétation des résultats pour les poutres B**

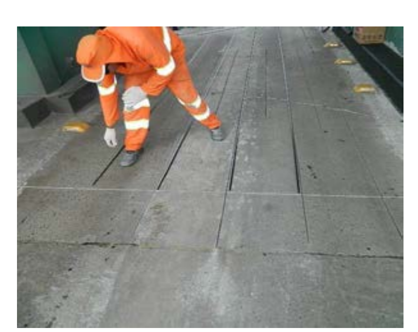
Le comportement charge - déformation est sensiblement identique, à l'exception du fait que la charge de rupture atteinte est considérablement plus élevée pour les poutres avec les *Lamelles S&P CFK* engravées.

**Avantages de l'emploi de lamelles engravées**

- Comme de plus grands efforts peuvent être ancrés, la lamelle est mieux exploitée; ceci se traduit par des sections de lamelle plus faibles.
- La longueur d'ancrage est réduite pour des moments négatifs.
- L'exécution d'engravures est souvent meilleur marché que la préparation et l'égalisation du support pour des lamelles collées en surface.
- Les lamelles engravées sont protégées contre les dommages mécaniques.

**Le domaine idéal** d'utilisation pour les lamelles engravées est le renforcement de dalles ou poutres en supérieur (renforcement du moment négatif/moment sur appui). Des applications verticales (murs ou piliers) sont aussi possibles. Le dimensionnement s'effectue à l'aide du logiciel S&P *„FRP Lamella“*.

**La valeur recommandée pour l'allongement maximal de dimensionnement (allongement limite : $\varepsilon_{f,lim,d}$ ) des *Lamelles S&P CFK* engravées est de 8 à 10 ‰., selon le E-Modul.**


*Images 23 / 24 / 25: Lamelles engravées dans le béton*

## 5.4 Système de précontrainte pour les Lamelles S&P CFK

Un système de précontrainte pour les *Lamelles S&P CFK* a été développé par S&P. Ce système est mis en place exclusivement par un réseau mondial de partenaires spécialisés dans son application, en collaboration avec les techniciens de chez S&P.





*Images 26 / 27: Système breveté de précontrainte S&P*



*Image 28: Précontrainte avec méthode de gradient*

### 5.4.1 Essai sur dalles

A l'occasion d'une série d'essais, l'Université Technique de Fribourg HES-SO, CH, a renforcé des dalles en béton avec des *Lamelles S&P CFK* précontraintes et non précontraintes. Les images et tableaux suivants présentent brièvement le dispositif d'essai ainsi que les résultats.

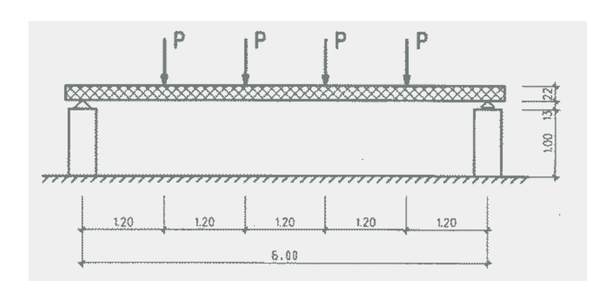



*Image 29: Dispositif de l'essai.*

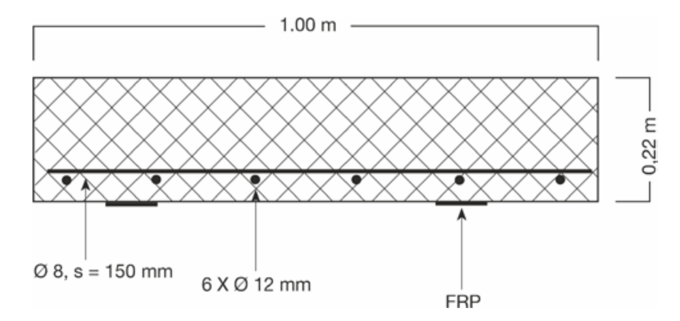



*Image 30: Coupe de la dalle en béton*

| | Acier longs | Acier large | FRP | Précontrainte ‰ | Précontrainte (N/mm$^2$) | Effort de précontrainte (kN) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Référence LC1** | 6 Ø 12 | (Ø8 s =150) | 0 | - | - | - |
| **LC5 FRP** | 6 Ø 12 | (Ø8 s =150) | 2 lamelles S&P CFK 150/2000, type 80/1.2 mm | - | - | - |
| **LP2 FRP 4 ‰** | 6 Ø 12 | (Ø8 s =150) | | 4 | 640 | 122 |
| **LP4 FRP 6 ‰** | 6 Ø 12 | (Ø8 s =150) | | 6 | 960 | 184 |

*Tableau 1: Armature et renforcements des dalles d'essai.*





## Résultats d‘essai

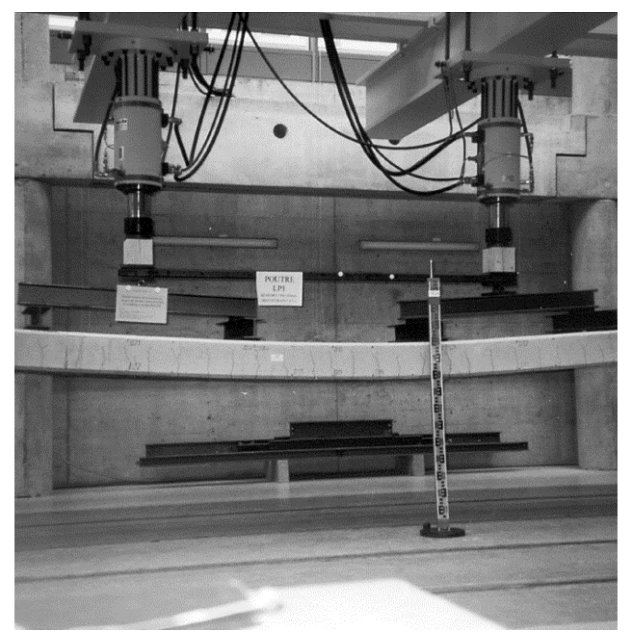



*Image 31: Dispositif d'essai HES-SO Fribourg (CH)*

Une importante réduction de la flèche et de la largeur des fissures à l'état d'utilisation a été démontré pour les dalles renforcées avec des *Lamelles S&P CFK* précontraintes. Suite à l'effort normal superposé, les sections transversales du béton restent au stade I non fissuré jusqu'au-delà des charges d'utilisation maximales.

Les charges de ruptures et les déformations associées sont fortement augmentées.

L'augmentation de la résistance à la rupture pour la dalles renforcées avec des *Lamelles S&P CFK* non précontraintes est de l'ordre de 32%. Avec des *Lamelles S&P CFK* précontraintes, l'augmentation est de 82% lors d’une précontrainte de 4 ‰ et de 113% pour une précontrainte de 6 ‰.

Les déformations supplémentaires des *Lamelles S&P CFK* précontraintes sont encore augmentées, par rapport à celles des *Lamelles S&P CFK* non-précontraintes.

| **Lamelle S&P CFK** | **Dalle en béton** | **Effort de ruine** (kN) | **Moment de ruine** (kNm) | **Allongement à la rupture** (‰) | **Moment de ruine** (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| - | Référence LC1 | 16.4 | 82.6 | - | **100** |
| 2 x 80/1.2 mm | LC5 FRP | 24.0 | 109.4 | 6.0 | **132** |
| 2 x 80/1.2 mm | LP2 FRP 4 ‰ | 35.3 | 150.1 | 13.7 | **182** |
| 2 x 80/1.2 mm | LP4 FRP 6 ‰ | 42.6 | 176.4 | 14.9 | **213** |

*Tableau 2*: *Résultats des essais sur dalles*

## Conclusion

Le renorcement avec le système de précontrainte des *Lamelles S&P CFK* exerce une influence très positive sur le comportement des constructions en béton armé. Les déformations et la fissuration sont réduites à l’état de service. Le moment de ruine est largement augmenté. Grâce aux dispositifs de précontrainte S&P, il est possible de précontraindre progressivement les *Lamelles S&P CFK* jusqu’à un allongement de 6 ‰. Ce système est particulièrement adapté au renforcement de structures présentant des portées importantes ou soumises à de très fortes charges.





### 5.4.2 Essai sur poutres

Des poutres renforcées par des *Lamelles S&P CFK* précontraintes ont fait l'objet d'un projet de recherche à l'Université de Gliwice (Pologne). Le comportement des poutres sous charge a été analysé et l'efficacité en fonction du degré de précontrainte a été étudiée.
Les essais de la série utilisant des *Lamelles S&P CFK* de type 90/1.4 sont résumés ci-après.

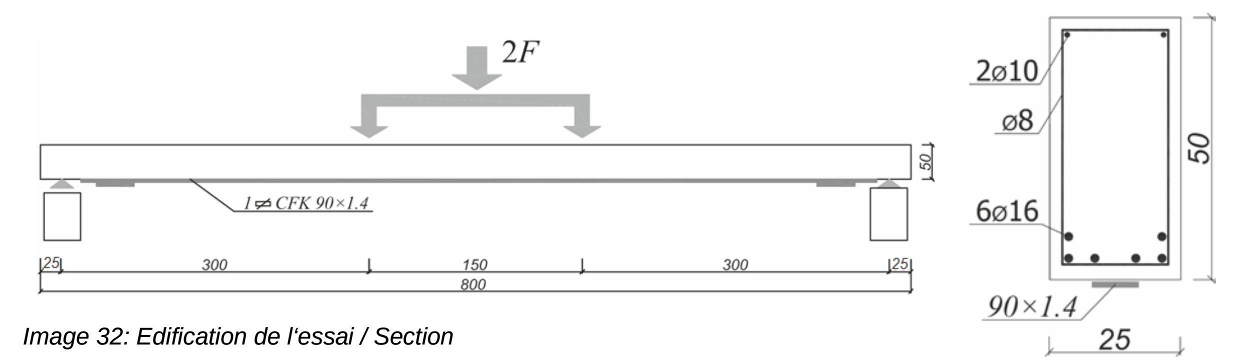



*Image 32: Edification de l'essai / Section*

| **Poutres** | **Acier** | **Lamelle S&P CFK** | **Précontrainte** ‰ | **Précontrainte** ($N/mm^2$) | **Effort de précontrainte** (kN) |
|---|---|---|---|---|---|
| **Référence B1** | 6 Ø 16mm (fy=340N/$mm^2$) | Lamelle S&P CFK 150/2000 Type 90/1.4 mm | - | - | - |
| **B4 C FRP** | | | - | - | - |
| **B1 C-FRP 3 ‰** | | | 3 | 495 | 62 |
| **B6 C-FRP 6 ‰** | | | 6 | 990 | 125 |

*Tableau 3: Caractéristiques des différentes poutres d'essai*

### Résultats des essais

Les poutres renforcées présentent une augmentation de la résistance à la flexion tant à l'état de service qu'à l'état ultime. Les déformations (flèches) sont plus faibles pour les poutres dont les lamelles sont mise en précontrainte. Pour toutes les poutres renforcées de lamelles, une importante réduction de l'ouverture des fissures a été constatée. La rupture des poutres munies de *Lamelles S&P CFK* précontraintes est détectable à temps (haute déformation). Une augmentation de la charge de ruine a été constatée. L'augmentation de résistance pour les poutres avec *Lamelles S&P CFK* collées est de 32 % par rapport à la poutre de référence. Des augmentations de 42 % et de 58 % ont été observées pour les poutres munies de *Lamelles S&P CFK* précontraintes à respectivement 3 ‰ et 6 ‰.

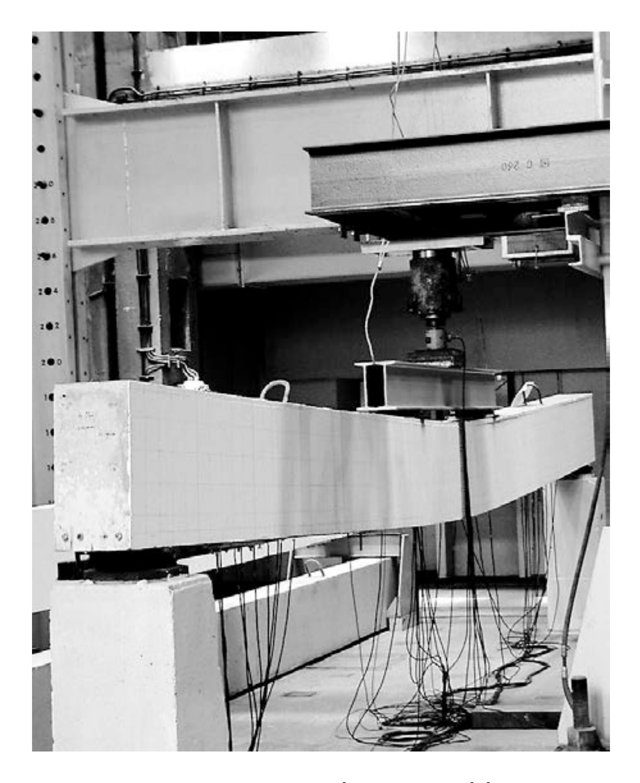


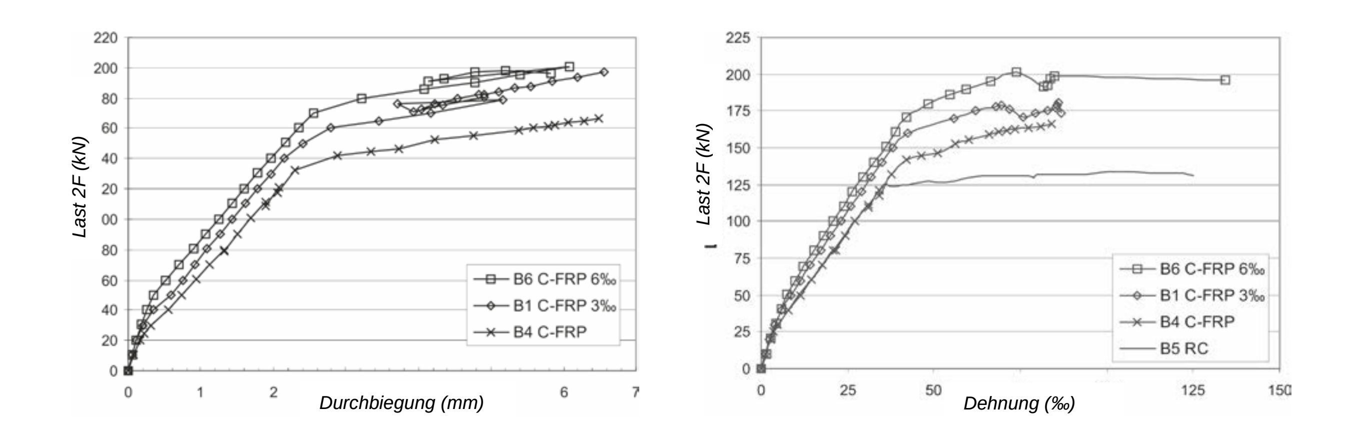
*Image 33: Dispositif d'essais à l'Université à Gliwice (PL)*





| Lamelle S&P CFK | Poutre en béton | Effort de ruine 2F (kN) | Moment de ruine (kNm) | Moment de ruine (%) |
|---|---|---|---|---|
| - | B5 Référence | 122 | 204 | **100** |
| 90/1.4 mm | B4 C-FRP | 166 | 270 | **132** |
| 90/1.4 mm | B1 C-FRP 3 ‰ | 179 | 289 | **142** |
| 90/1.4 mm | B6 C-FRP 6 ‰ | 202 | 323 | **158** |

*Tableau 4: Résultats Effort de ruine / Moment de ruine*




*Images 34 / 35 : Résultats d'essais: Diagramme force-flèche (gauche) et diagramme force-allongement (droite)*

### Conclusion

Comme pour les dalles soumises à une précontrainte extérieure en *Lamelles S&P CFK*, les essais sur des poutres ont montrés des résultats positifs. Les flèches ainsi que l'ouverture des fissures sont diminuées. Les charges de rupture sont fortement augmentées. Pour la précontrainte, des lamelles à faible module d'élasticité sont utilisées.

**La valeur recommandée pour l'allongement maximal de dimensionnement (allongement limite : $\varepsilon_{f,lim,d}$ ) des *Lamelles S&P CFK* précontrainte est de 12 ‰. (Allongement de la précontrainte de 4 à 6 ‰).**

De nombreuses applications avec des lamelles précontraintes sont possibles dans le domaine de la construction :

- Renforcement à posteriori de parties d'ouvrages surchargées
- Précontrainte externe d'ouvrages dont les câbles de précontrainte interne sont corrodés.
- Assainissement des joints de couplage des câbles de précontrainte
- Limitation des flèches

## 5.5 Renforcements de maçonnerie avec des Lamelles S&P CFK

La maçonnerie constitue un mode de construction avantageux en termes de physique du bâtiment et de coût. Ce pocède est utilisée dans le monde entier et continuera vraissemblablement à être utilisée dans le futur. En raison de l'utilisation de différentes





qualités de briques et de mortier, sa résistance est sujette à de fortes variations. Le renforcement d’ouvrages en maçonnerie, principalement vis-à-vis des sollicitations sismiques, joue un rôle de plus en plus important dans le domaine du renforcement des structures.
Tant les lamelles que les Sheets (voir chapitre 6) peuvent être utilisés pour le renforcement d’ouvrage en maçonnerie. En cas de renforcement avec des lamelles, on portera une attention particulière à l’introduction des forces dans la structure existante.

Dans le concept de renforcement, des *Lamelles S&P CFK* sont disposées en diagonale sur une maçonnerie existante et ancrées dans les éléments en béton en prérifério. Des essais à l'EMFA Dübendorf (CH) montrent que l'effort de traction d'une lamelle CFK de 50 mm largeur et de 1.2 mm d'épaisseur peut être ancré dans une rainure dans une profondeur de 25 - 30 cm dans un élément en béton limitrophe. Une maçonnerie renforcée avec cette méthode se comporte de manière élastique jusqu'à environ 2/3 de l'effort tranchant maximum $V_{A,max}$. (image 35). Suite au décapage des lamelles CFK sous un effet d'effort de la maçonnerie, la déformation peut être augmentée fortement dans les étapes de déformation supérieures sans que la capacité portante n'augmente largement. Les parois de maçonnerie disposent des grandes réserves de déformation, grâce auxquelles une ductilité élevée est atteinte. La résistance de séisme (paroi BW6) peut être augmentée par rapport à une paroi portante non renforcée (référence BW5) a presque quadruplé. Comme la fig. 35 le montre, la ductilité de la paroi peut être plus que triplée et de plus, la capacité portante peut être augmentée d'un facteur 1.4. Lors de l'essai, la lamelle CFK a été disposée unilatéralement.

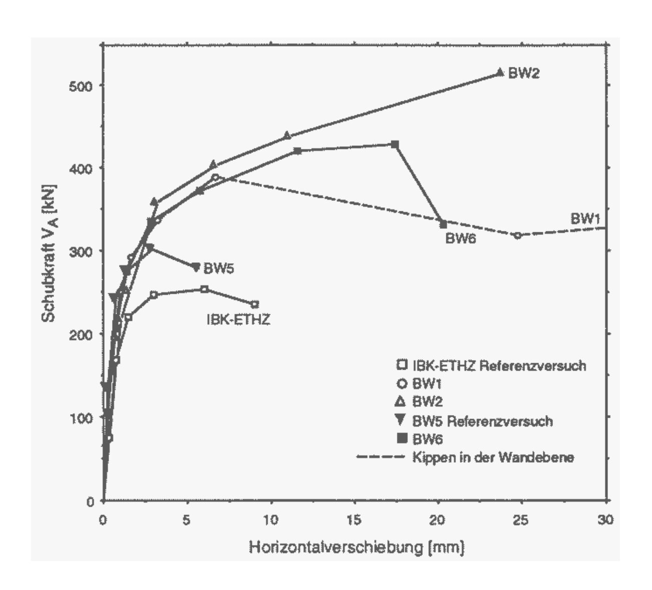



*Image 36: Comparaison maçonnerie renforcée FRP avec un essai de référence*

*Image 37: Paroi portante avec et sans ouvertures*

L'effort de séisme de remplacement $Q_{acc}$ horizontal ainsi que le poids propre et la surcharge s'appliquent dans les planchers et doivent être dérivés sur les parois portantes. Dans les parois portantes des étages supérieurs, combinés avec des faibles efforts normaux, de larges efforts de cisaillement naissent suite à l'effort de remplacement $Q_{acc}$ distribué triangulairement. La résistance portante est souvent excédée par le rapport défavorable de l'effort normal de l'effort tranchant. Dans les étages supérieurs, un renforcement doit ainsi être disposé dérivant les hauts efforts par des tirants verticaux et diagonaux.

La disposition du renforcement est largement dépendante de la combinaison des efforts intérieurs $M_z$, $N_x$ et $V_y$. Pour les parois portantes critiques dans les étages les plus inférieurs et supérieurs, il résulte de différentes exigences en matière de renforcement. Dans la fig. 36 on montre comment les efforts résultants sont conduits autour des ouvertures. Les ancrages des lamelles et les zones de compression maximum des parois portantes doivent être examinés spécialement. L'exemple spécifié montre clairement que la méthode de champs de contraintes peut être utilisée très universellement.



*Images 38 / 39 / 40: Renforcement sismique de maçonnerie à l'aide de Lamelles S&P CFK ancrées dans la dalle en béton.*

# 6. Système FRP laminé sur site (Tissus)

Les *S&P Sheets* (tissés/non-tissés) peuvent être mis en place soit par voie sèche, soit par voie humides, c'est à dire après avoir été imprégnés.
Le rôle de la matrice époxy est de permettre la transmission des efforts d'une fibre à l'autre ou au support renforcé. Pour le dimensionnement, seule la section théorique des fibres ainsi que leurs caractéristiques mécaniques sont prises en considération. L'épaisseur théorique d'un laminé sur site (Tissu) est déterminée comme suit:

Coupe transversale d'un Sheet FRP



$$\text{Epaisseur théorique} = \frac{\text{Poids des fibres dans la direction renforcée}}{\text{Densité des fibres}}$$

La disposition des fibres n'est pas toujours optimale lors d'une pose à la main. Elles peuvent être endommagées lors de l'application manuelle. Pour ces raisons il y a lieu de tenir compte d'un facteur de réduction environnemental (y).

**Facteur de réduction environnemental (y)** recommandé:

| | |
|---|---|
| **Tissu S&P C-Sheet (carbone)** | **y = 1.2** |
| **Tissu S&P A-Sheet (aramide)** | **y = 1.3** |
| **Tissu S&P G-Sheet (verre)** | **y = 1.4** |

Les caractéristiques théoriques des *S&P Sheets* pour une pose à la main sont données dans les fiches techniques (www.sp-reinforcement.eu).

## 6.1 Systèmes de résines époxy perméable à la vapeur




*Image 41: "Une structure doit rester perméable à la vapeur d'eau de l'intérieur vers l'extérieur", VITRUV, architecte et ingénieur, env. 50 av. JC*

Directive ACI 440 pour le FRP
(Chapitre 8.3.3 Durabilité)

Selon la directive américaine 440 concernant les renforcements externes en FRP:

Si un confinement complet au moyen de FRP est utilisé, il faut prendre en considération les aspects de la physique des constructions que sont la perméabilité à la vapeur et à l'eau.





Il est impératif de tenir compte des conditions de la physique des constructions lors de la mise en œuvre d'un recouvrement total de matériaux minéraux (béton). 30% à 50% de la surface recouverte doit encore être perméable à la vapeur d'eau. L'utilisation d'une matrice époxy dans de telles circonstances n'est donc pas indiquée.

*S&P Resicem* est une matrice époxy spéciale traitée au ciment. L'action combinée des deux différents moyens de liaison se traduit par un accroissement des cristaux de ciment sous l'effet de la vapeur d'eau au cœur du canevas déjà existant de la matrice. Ce système de matrice, imperméable lors de sa pose, deviendra perméable sous l'action progressive de la vapeur d'eau. Le ciment de la matrice procure une protection contre la corrosion de l'armature interne sous la forme d'un dépôt alcalin supplémentaire. La valeur de la diffusion à la vapeur d'eau pour une épaisseur de FRP d'environ 1 mm et traitée avec du *S&P Resicem* oscille entre 3'000 et 5'000. Une application est possible sur un support d'une humidité intrinsec jusqu'à 12%.

**Valeur limite de la perméabilité à la vapeur d'eau d'une couche**

| **$S_d = \mu H_2O$ x épaisseur de la couche (m) < 4 m** |
|---|

**$S_d$:** résistance à la diffusion de vapeur d'eau de la couche
**$\mu H_2O$:** valeur de la diffusion de la vapeur d'eau du revêtement

*S&P Resicem :* $\mu H_2O$ = 3'000 – 5'000 (épaisseur de la couche d'env.1 mm)
*S&P Resin 50/55* (résine époxy) : $\mu H_2O$ = 1'000'000 (épaisseur de la couche d'env.1 mm)

**Par conséquent:**
$S_d$: une couverture FRP en deux couches au moyen de *S&P Resicem*.
0.8 mm épaisseur totale (matrice + fibres)
$S_d$ = 4'000 x 0.0008 = 3.2 m < 4 m ✓

La diffusion à la vapeur d'eau du système FRP avec du *S&P Resicem* est ainsi garantie.

## 6.2 Renforcement de sommiers

Dans le cadre d'un renforcement de sommiers en béton armé à la flexion, il faut également effectuer la vérification de la résistance à l'effort tranchant de l'élément. Selon la norme SIA 262, seule l'armature d'effort tranchant reprend l'effort de cisaillement (sans contribution du béton).

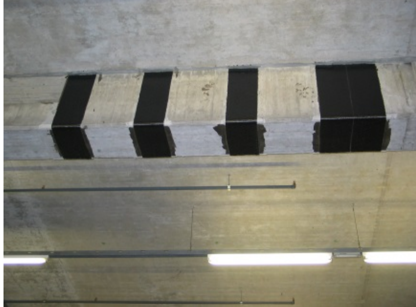
Si un renforcement à l'effort tranchant s'avère nécessaire, S&P propose le *S&P C-Sheet 640*. Ce tissu non-tissé contient des fibres avec un module d'élasticité extrêmement élevé (640 $kN/mm^2$). Pour le dimensionnement, l'allongement maximal est de 2 ‰. Cela implique que le *S&P C-Sheet 640* doit être en mesure de ramener l'entier de l'effort tranchant aux appuis pour un allongement ne dépassant pas 2 ‰ – allongement maximal identique à celui de l'armature existante. Un allongement des Sheets plus important que 2 ‰ peut mener à la rupture prématurée de l'élément ; en effet, une rupture à l'effort tranchant se produit de manière inattendue, pour de faibles déformations (mécanisme de rupture fragile, au contraire d'une rupture en flexion).




Le logiciel de dimensionnement „FRP Lamella“ calcule le nombre de couches nécessaires et les distances entre les Sheets. L’armature d’effort tranchant supplémentaire doit être ancrée dans la zone comprimée pour chaque situation de renforcement. Ceci est réalisé grâce à des entailles dans la dalle ou à l’aide de pièces d’ancrage en acier.

Dans le cas d’ouvertures ultérieurs pour des portes, des fenêtres, des réservations etc., les armatures d’effort tranchant sectionnées sont à compenser par des *S&P C-Sheet 640,* ou éventuellement par des *S&P C-Sheet 240.*

Pour l’application des *S&P C-Sheet*, il faut se référer aux instructions de mise en oeuvre de S&P.


*Images 42 / 43 / 44: Renforcement d’une poutre en béton armé avec des S&P C-Sheet 640, sur toute la surface ou ponctuellement (selon un modèle de treillis), avec ancrage dans la zone comprimée.*

## 6.3 Renforcement d’éléments soumis à la traction par flexion ou à la traction simple

Si un renforcement à la flexionnelle à l’aide de *Lamelles S&P CFK* devait s’avérer impossible, un remplacement par les *S&P C-Sheet 240* est possible. Les supports en béton dont la résistance à l’arrachement est faible ($f_{ctH}$ de 1.0 à 1.5 N/mm$^2$) constituent le domaine d’application principal des Sheets. Le nombre de couches nécessaires est déterminé en fonction des caractéristiques techniques, de la même manière que pour les lamelles. Un domaine d’application supplémentaire des *S&P C-Sheet 240* est l’ancrage des *Lamelles S&P CFK* dans les zones de décrochement des dalles ou aux extrémités des murs. Dans de tels cas, il est possible d’appliquer les *S&P C-Sheet 240* aux angles des éléments, en respectant un rayon minimal (≥ 25 mm). Consulter les instructions de mise en oeuvre pour plus de détails.



*Image 45: Application sur la face supérieure d’une dalle*



*Image 46: Application en tant qu’ancrage d‘extrémité*





# 6.4 Renforcement d’éléments comprimés

Pour le renforcement d‘éléments comprimés de sections circulaire ou rectangulaire, il convient d’utiliser les *S&P Sheets* en fibres de carbone, de verre ou d’aramide. Le choix du type de fibres sera effectué par l’ingénieur, en fonction des exigences statiques et des critères économiques. De manière générale, les fibres suivantes sont recommandées en fonction du but visé :

| | | |
|---|---|---|
| **Augmentation de la ductilité:** | **Tissu en fibres de verre** | **S&P G-Sheet** |
| **Augmentation de la résistance:** | **Tissu en fibres de carbone** | **S&P C-Sheet** |
| **Protection contre les explosions / chocs:** | **Tissu en fibres d’aramide** | **S&P A-Sheet** |

Les domaines d’utilisation et les modes de fonctionnement correspondants ont été évalués scientifiquement lors de divers essais. Les illustrations suivantes présentent le test « pull-push » sur des systèmes FRP ainsi que les résultats.

Dans ce test deux types de confinement FRP ont été comparés à une colonne de référence:

- *S&P C-Sheet 240* (E-Modul 240 kN/m$^2$) => 1.0 kg/m$^2$ de fibres horizontales
- *S&P G-Sheet 90/10* (E-Modul 65 kN/m$^2$) => 3.6 kg/m$^2$ de fibres horizontales

Comme le module d'élasticité des fibres de verre équivaut à environ 25% de celui des fibres de carbone, le grammage du S&P G-Sheet appliquée est 3.6 fois plus important pour avoir une base de comparaison.

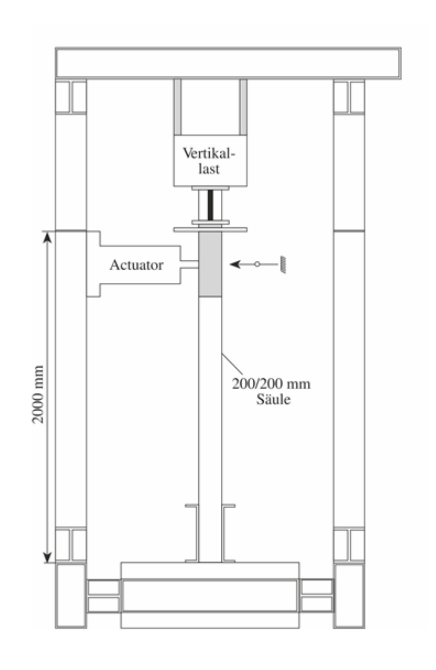



*Image 47: Essai Pull-Push*

*……* *colonne de référence*
*- - -* *colonne renforcée avec S&P C-Sheet 240*
*——* *colonne renforcée avec S&P G-Sheet 90/10*

*Image 48: Résultat d’un essai pull-push*

Les résultats montrent clairement le comportement plus ductile d'une colonne frettée avec des fibres de verre par rapport à une colonne frettée avec des fibres de carbone. C'est la raison pour laquelle les fibres de verre sont principalement utilisées pour le renforcement sismique de structures.





Dans la campagne d'essai menée à l'Université Technique de Gent (B), des colonnes rondes de 2,0 m de hauteur et d'un diamètre de 400 mm ont été frettées avec des systèmes FRP différents.

Systèmes FRP:

- *S&P C-Sheet 240* avec 1.0 kg/m$^2$ de fibres horizontales
- *S&P C-Sheet 640* avec 1.6 kg/m$^2$ de fibres horizontales
- Tissu en fibre de verre avec 3.6 kg/m$^2$ de fibres horizontales


Image 49: Dommage après chargement

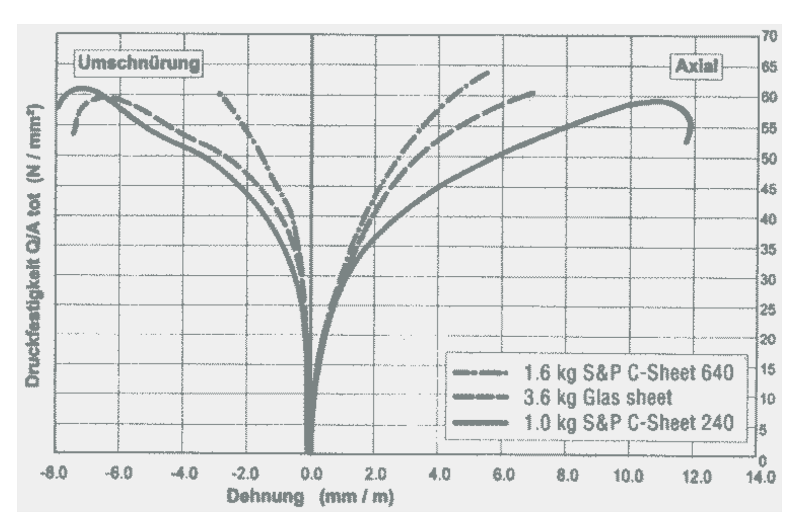
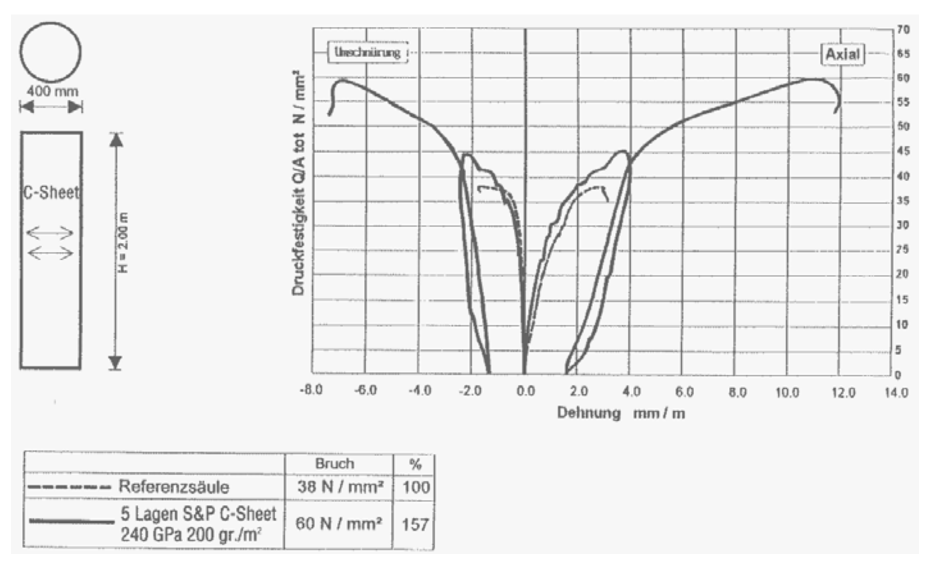


*Image 50: Résultats d'essai de l'UT de Gent (B)*

Le renforcement au moyen de *S&P C-Sheet 240* est mieux adapté pour le confinement d'éléments comprimés. Des valeurs identiques sont atteintes avec 1.0 kg/m$^2$ de fibres de carbone et 3.6 kg/m$^2$ de fibre de verre dans le sens de frettage.

Résultats de la colonne de référence (non-renforcée) et de la colonne frettée avec cinq couches de *S&P C-Sheet 240* (5 x 200 g/m$^2$ = 1 kg/m$^2$).




| | Bruch | % |
|---|---|---|
| Referenzsäule | 38 N / mm² | 100 |
| 5 Lagen S&P C-Sheet 240 GPa 200 gr./m² | 60 N / mm² | 157 |

*Image 51: Résultats d'essai de l'UT de Gent (B)*

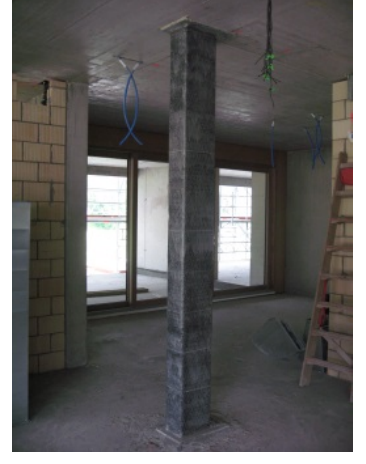
Lors de ces essas la résistance à la compression a été augmentée de 57 % au moyen d'un confinement en FRP. A la ruine, la déformation verticale d'une colonne renforcée se monte à 11 mm/m. Une telle déformation n'est pas souhaitable en service, c'est pourquoi le confinement en fibre de carbone n'est utilisé que pour assurer une couverture de la sécurité structurale. Un degré de renforcement de 1.8 à 2.0 est ainsi réaliste.

Durant les dernières années, l'effet du confinement FRP de colonnes en béton armé a été vérifié par plusieurs études scientifiques. Diverses bases de dimensionnement et de conception de confinement FRP sont disponibles (p. ex. Seismic conception and retrofit of bridges de M.J.N. Priestley, F. Seibel, G.M. Calvi).

Un confinement FRP de colonnes rectangulaires est plus problématique qu'un confinement de colonnes circulaires. D'autres expériences montraient qu'un confinement FRP peut très efficacement empêcher un possible épuisement en cisaillement. Des confinements FRP n'augmentent la résistance à la flexion involontaire qu'à un minimum.

De nombreux travaux de recherche ont démontrés que le frettage d'éléments en béton armé existants – dans les zones de rotules plastiques – augmente la résistance et la ductilité des cadres en béton armé. En outre, des essais ont montré qu'une augmentation plus importante de la ductilité est atteinte en utilisant des systèmes G-FRP, plutôt que des systèmes C-FRP. Ceci est dû à la valeur plus élevée de l'allongement à la rupture des fibres de verre.







*Images 52 / 53: Renforcement de piliers à l'aide de S&P C-Sheets*



*Image 54: Renforcement de paroi à l'aide de S&P G-Sheet*

## 6.5 Renforcement sismique

De nombreux ouvrages anciens en béton armé présentent une résistance trop faible face aux sollicitations sismiques. La ductilité ou la résistance en flexion des éléments comprimés (piliers) y est insuffisante. Le recouvrement des armatures n'est généralement pas conforme et les extrémités des piliers ne sont pas convenablement conçues. Concrètement, si une rotule plastique se forme à l'endroit du recouvrement ou dans la zone d'ancrage, cela mène à la défaillance précoce de l'élément. Le flambage des armatures longitudinales constitue un autre mécanisme de rupture. Le renforcement à l'aide d'éléments de frettage FRP a fait ses preuves dans la pratique et

est utilisé avec succès. Le logiciel S&P „*FRP Colonna*“ est utilisé pour le dimensionnement.
Pour un dimensionnement correct des ouvrages soumis aux sollicitations sismiques, l’ingénieur doit identifier les mécanismes déterminants et être capable de les transposer à la statique. Les types de dommages les plus fréquemment subis par les cadres en béton armé sont décrits ci-après.

**Short Column**

Des fissures de cisaillement nées très tôt dans le béton peuvent être attribuées à une capacité de recette de force transversale insuffisante dans le secteur de raccordement colonne/poutre respectivement colonne/dalle. Cette fissuration permet l'ouverture des étriers d'armature de cisaillement interne et conduit à l'épuisement de l'élément d'appui. Cet épuisement peut être empêché au moyen d'un renforcement de force transversale avec un FRP dans le secteur de raccordement des colonnes. Puisqu'il faut de plus surveiller la ductilité générale du bâtiment, le tissu *S&P G-Sheet 90/10* se prête spécialement comme confinement FRP. Les confinements FRP à l'aide de fibre C conviennent moins pour cette application suite au module d'élasticité élevé. Dans ces circonstances, les critères relatifs à la ductilité de bâtiment seraient moins satisfaits. (Ductilité de l’ouvrage déterminante).



*Image 55: “Short Column”*

**Nœuds formés faiblement**

D'autres types d'épuisement sont des nœuds trop faiblement formés ou une charge admissible manquante suite à une section transversale affaiblie. Un type d'épuisement apparaissant souvent supplémentairement est la longueur de recouvrement insuffisante de l'armature verticale interne de l'élément d'appui au niveau du raccordement de la colonne. Un renforcement ultérieur peut avoir lieu au moyen de lamelles CFK entaillées verticalement ou collées superficiellement confinées dans secteur avec la *S&P G-Sheet 90/10* dans le secteur du nœud.



*Image 56: Nœud formé faiblement*





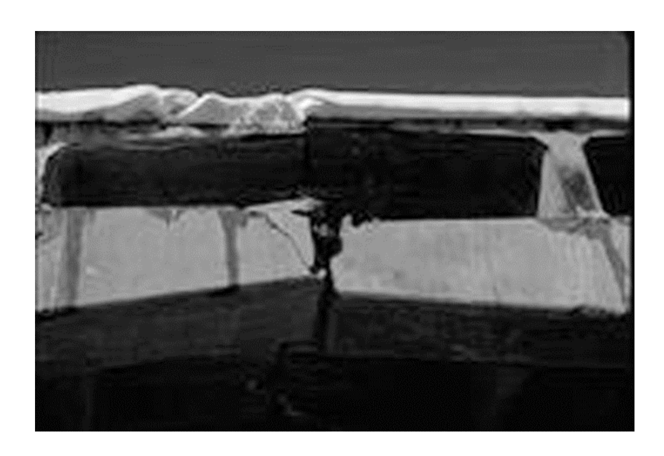


Image 57: Rupture par cisaillement dans une articulation plastique

## Articulations plastiques

L'épuisement de poutres en flexion peut avoir lieu dans le cas d'articulations plastiques. Ceci est du à une armature de cisaillement insuffisante, comme représenté dans la figure ci-contre. Un confinement en FRP à haut module *S&P C-Sheet 640* sera utilisé comme renforcement. Les *Lamelles S&P CFK,* engravées ou collées en surface, se prêtent bien au renforcement de poutres présentant une résistance insuffisante à la traction par flexion.

## Méthodologie du renforcement FRP

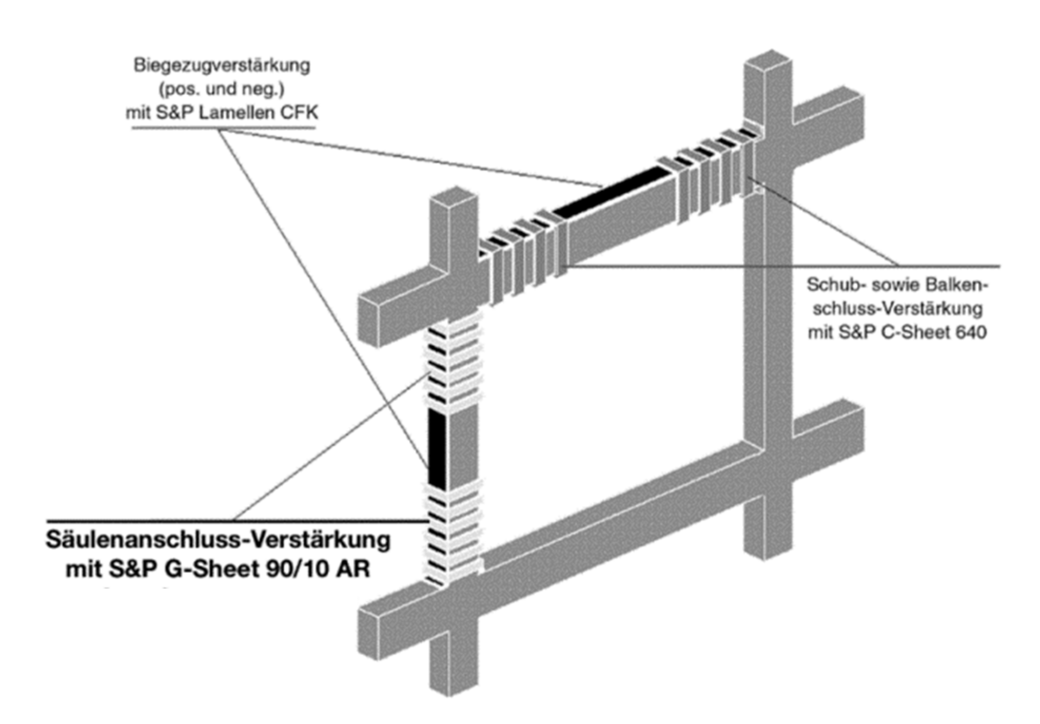



Image 58: Renforcement de cadre en béton armé

Des expériences à grande échelle ont montré que des confinements FRP sont techniquement plus favorables et également plus économiques en comparaison a des renforcements au moyen d'enrobages en acier. Grâce à un confinement FRP de la colonne, l'épuisement du béton a lieu après de plus grands allongements.
Le confinement en FRP empêche l'allongement transversal et sert en plus de renforcement contre le flambage de l'armature longitudinale.

Avant le confinement en FRP, les fissures dans les éléments porteurs devraient être injectées à l'aide de résines époxy pour permettre le transfert des efforts.

Comme énoncé au chapitre 5, les éléments en maçonnerie peuvent être renforcés à l'aide de Sheets. Si l'intervention vise principalement à augmenter la ductilité de l'élément, il convient d'utiliser les *S&P G-Sheet*.





## 6.6 Protection contre les explosions et contre les chocs

### 6.6.1 Protection contre les explosions

Il s'agit souvent de réparer des dommages à des bâtiments du à des conflits (guerre) ainsi que par des explosions. Le renforcement contre les effets d'explosions est une demande de l'industrie chimique. Tandis que des explosions industrielles sont évaluables et peuvent par conséquence être modélisées, il n’est pas possible d’estimatier l'effet résultant d'une bombe. Les bâtiments industriels traditionnels sont souvent trop peu armés. Dans la pratique, les structures portantes sont souvent en maçonnerie et faiblement armées. De telles structures porteuses ont une faible résistance contre les effets d'explosions. Les méthodes de renforcement traditionnelles en acier sont couteuses et difficiles à réaliser. Les systèmes FRP offrent une solution économique en temps et en coûts.

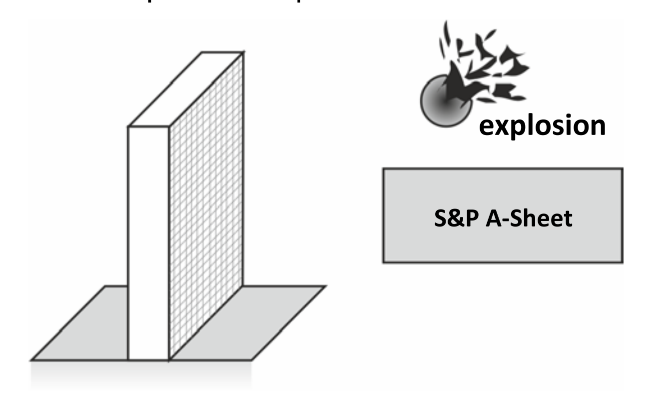



*Image 59: Protection des éléments soumis aux explosions*

Les fibres d’Aramide (*S&P A-Sheet 120*) appliquées bi-directionnellement conviennent parfaitement pour la protection contre les explosions. Les qualités mécaniques des fibres Aramide et spécialement l’excellent comportement dans le sens transversal aux fibres les prédestine à ce domaine d'application. La résistance contre les effets d'explosions d'une maçonnerie renforcée au moyen de A-FRP a pu être augmentée d'un facteur 5 à 10. Les rapports de recherche correspondants sont fournis par les fabricants des fibres Aramide.

### 6.6.2 Protection contre l’impact

Les éléments d'appui, par exemple aux passages supérieurs d'autoroutes, sont dans la pratique souvent sous-dimensionnés contre l'impact de véhicules. Les efforts horizontaux suite à l'impact d'un camion ne peuvent parfois pas être absorbés par l'appui et conduisent à l’effondrement de l’ouvrage supérieur. Des méthodes de renforcement traditionnelles comme le frettage en béton sont indésirables pour des raisons esthétiques mais également de place. L'exécution d’un frettage en béton exige en plus de longues interruptions du trafic. Le frettage en A-FRP est une alternative pour ce type de renforcement.
En Angleterre, l'effet du confinement en A-FRP de colonnes rondes contre l'impact de véhicules a été testé par les fabricants des fibres. Les A-FRP ont été disposés axialement et transversalement. Des tissus avec une masse surfacique de 290 g/m$^2$ ont été utilisés. Un programme expérimental identique a eu lieu à l'EIA Fribourg (CH) pour des colonnes carrées. Dans les programmes d'étude, l'impact est simulé à l’aide d’une poutre en flexion.
Dispositif d’essai :

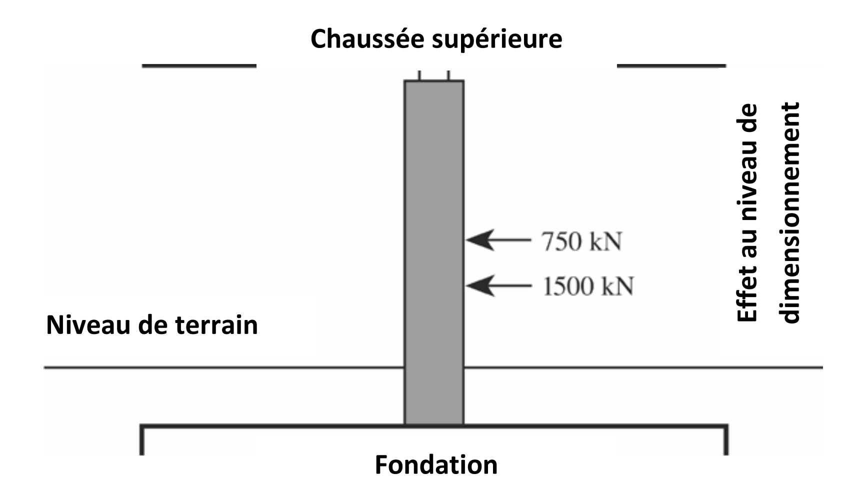


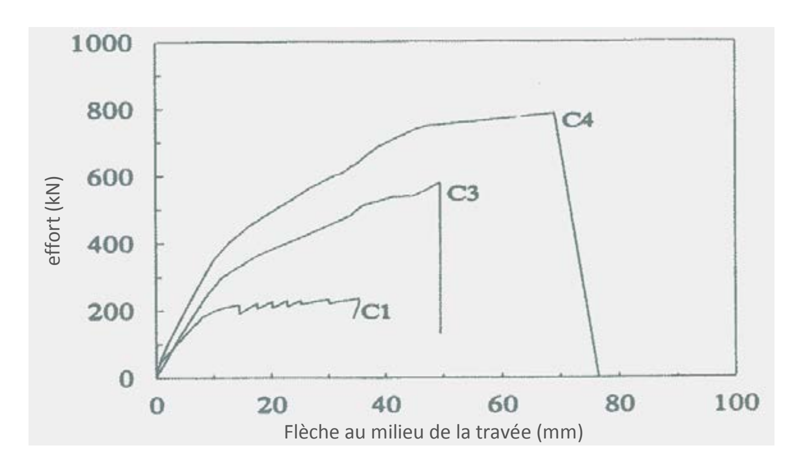

*Image 60: Colonne d'autoroute avec des efforts d'impacts horizontaux*

Les résultats des essais montrent que les éléments d'appui qui ont été renforcés dans les deux sens (verticalement ainsi que le sens de confinement) au moyen de A-FRP dissipent beaucoup plus d'énergie que des éléments d'appui non renforcés. La dicipation d'énergie est beaucoup plus faible avec des renforcements au moyen de C- et de G-FRP. Les fibres de carbone et de verre s'épuisent plus précocement suite au manque de capacité d'absorption des efforts transversaux. La fibre d'Aramide permet des déformations plus élevées de l'élément d'appui grâce à sa capacité d'absorption des efforts transversaux de la fibre.

A l'occasion des séries d'essais en Angleterre, trois colonnes renforcées à l'aide de A-FRP ont été testées. Les résultats sont résumés ci-dessous :

| **Colonne** | **Nombre des couches de tissu** | | **Effort max.** [kN] | **Flèche max.** [mm] | **Type de rupture** |
|---|---|---|---|---|---|
| | Longitudinales | transversales | | | |
| C1 | 0 | 0 | 233 | 34 | écoulement de l'armature interne et ensuite tassement du béton |
| C3 | 2 | 2 | 580 | 50 | rupture des fibres longitudinales |
| C4 | 3 | 2 | 785 | 69 | rupture des fibres longitudinales |

*Tableau 5: Résultats des tests de DUPONT UK (Fabricant de fibres Aramide)*




C1: colonne de référence

C3: 2 couches longitudinales + 2 couches transversales

C4: 3 couches longitudinales + 2 couches transversales

*Image 61: Diagramme effort-flèche*





# 7. Mesures de protection contre l'incendie

Lors d'un renforcement avec des lamelles en acier ou en CFK, il faut prendre en considération le fait que les colles à base d'époxy sont stables que jusqu'à des températures de 50°C à 80°C. Des températures supérieures, dans le cas d'un incendie, conduisent à la défaillance des lamelles (décollement).

**Le paramètre déterminant pour la définition des mesures de protection incendie est la sécurité globale résiduelle (θ) en cas de défaillance du renforcement en *Lamelles S&P CFK*.**
**Ce facteur de sécurité est calculé par le logiciel de dimensionnement S&P.**

**Sécurité de reste lors de la défaillance de la lamelle**

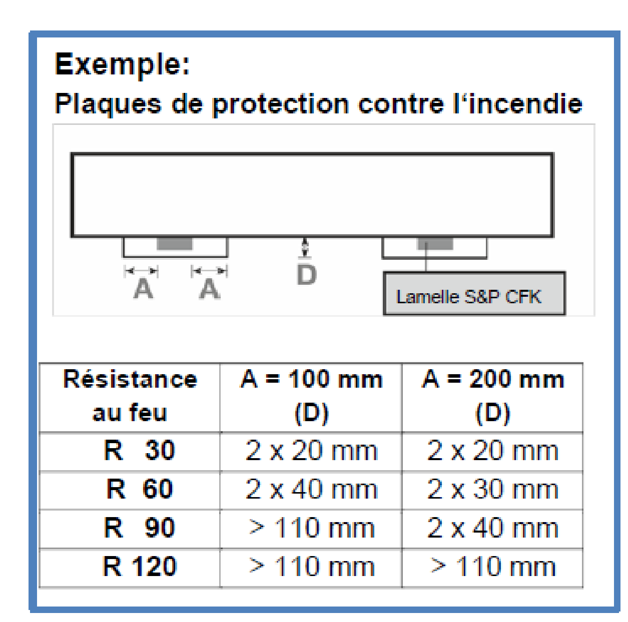
**θ > 1.0**



**L'armature interne garantit la réserve à l'incendie!**
**Sécurité structurale en cas d'incendie**



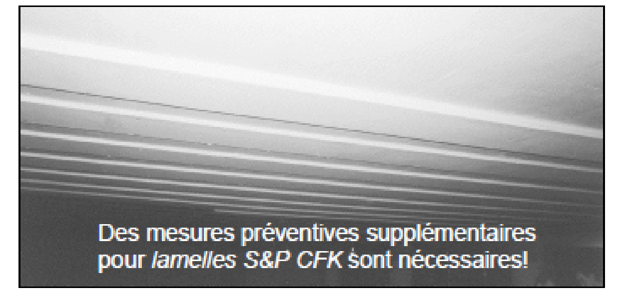
**Mesures de protection contre l'incendie habituelles seulement pour l'armature interne**

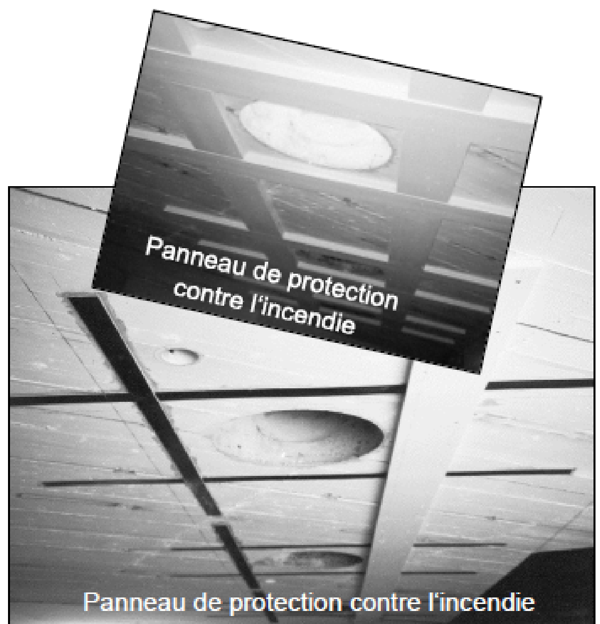

**Exemple:**
**Plaques de protection contre l'incendie**



| Résistance au feu | A = 100 mm (D) | A = 200 mm (D) |
|---|---|---|
| R 30 | 2 x 20 mm | 2 x 20 mm |
| R 60 | 2 x 40 mm | 2 x 30 mm |
| R 90 | > 110 mm | 2 x 40 mm |
| R 120 | > 110 mm | > 110 mm |

**θ < 1.0**



# 8. Essais relatifs à qualité

L’assurance qualité est à intégrer soigneusement durant l’ensemble des processus de renforcement FRP. Le chef de projet (ingénieur civil) doit, dès la phase de planification, définir quels examens sont nécessaires pour définir les mesures à prendre pour la statique. Les tests choisis et les contrôles de qualité à effectuer sont à lister dans le cahier des charges.

La direction locale des travaux ainsi que l’entreprise doivent, en toutes circonstances, s’assurer que les travaux sont exécutés conformément au dimensionnement. Les éléments porteurs ne seront enlevées qu’une fois le renforcement appliqué et après que l’ingénieur en charge des travaux ait donné son accord.

## 8.1 Support

### 8.1.1 Détermination de la résistance à la compression de béton

La campagne d’essai sera suffisamment poussé pour que l’on puisse en tirer des conclusions représentatives quant à la répartition des résistances du béton. Les endroits critiques, notamment aux droits des ancrages, seront analysés avec un soin particulier. Une méthode possible consiste à prélever des carottes pour les tester ensuite en laboratoire. Il est toutefois souvent suffisant de déterminer la résistance du béton au moyen d’un marteau d’essai de dureté par rebondissement (scléromètre).

### 8.1.2 Détermination de la résistance à la traction

L’adhérence de la lamelle en fibres de carbone sur la surface en béton est déterminante pour le choix du système de renforcement FRP. Les efforts de traction dans le FRP sont introduits dans le béton perpendiculairement à sa surface au moyen de contrainte de cisaillement.

En fonction du système de renforcement FRP, les valeurs suivantes concernant la qualité du support sont recommandées :

| **Système de renforcement FRP** | **Valeurs minimales de résistance à la traction du support $f_{ctH}$** |
|---|---|
| S&P G-Sheet (tissu en fibre de verre) | > 0.2 N/mm$^2$ |
| S&P C-Sheet / S&P A-Sheet | > 1.0 N/mm$^2$ |
| Lamelles S&P CFK | > 1.5 N/mm$^2$ |

*Tableau 6: résistance minimale à la traction du support $f_{ctH}$*

### 8.1.3 Préparation du support

Le support des systèmes de renforcement FRP doit être propre, dépoussiéré et ne présenter aucune trace d’huile ou de matière grasse. Pour les supports en béton, la laitance de ciment (ciment péliculaire) doit être enlevée par sablage, grenaillage ou ponçage. Les couches de peinture, matériaux d’isolation ou restes de bois doivent également être enlevés. Les travaux préparatoires doivent être effectués sans





endomager la structure granulaire du béton (pas de bouchardage). D'éventuelles fissures supérieures à 2 mm doivent être injectées.

### 8.1.4 Planéité de la surface

Des essais d'application ont démontré qu'en cas d'irrégularités importantes de la surface de béton, les *Lamelles S&P CFK* en fibres de carbone fraîchement appliquées se décollent. La rigidité à la flexion de la lamelle fait en sorte que celle-ci veut se mettre droite immédiatement après avoir été appliquée. La viscosité de la colle fraîche ne suffit pas pour maintenir la lamelle à la surface du béton. Dans les creux sous la lamelle, des bulles d'air et des vides se forment dans la colle. Ces zones affaiblissent la liaison et présentent un danger très important dans la zone des ancrages aux extrémités de la lamelle. Dans les zones concaves, les produits FRP sont comprimés contre le béton et ne peuvent donc pas donner lieu à de malfaçons.

Les systèmes FRP ne doivent pas être collés sur des supports irréguliers. Ceci pourrait entraîner des contraintes de déviation (poussées au vide) indésirables.
Les irrégularités ne doivent pas dépasser les valeurs suivantes :

< 5mm sous une latte métallique de 2 mètres

< 1 mm sous une section de 30 cm

On utilisera exclusivement des mortiers de compensation dûment testés.

### 8.1.5 Humidité du support

En cas d'utilisation de mortier S&P à base d'Epoxy (par ex. S&P Resin 50/55/220/230) la teneur en eau maximale du support est de 4%. Pour les mortiers S&P avec ajouts de ciment (par ex. Resicem), cette valeur est de 12%. En cas de teneur en eau supérieure, le support doit être séché pour atteindre ces valeurs.

### 8.1.6 Point de rosée

Avant l'application des systèmes FRP, le risque de condensation (point de rosée) à la surface du support doit être écarté. Pour ce faire, l'humidité relative et la température de l'air doivent être mesurées. Le point de rosée correspondant peut ensuite être défini. Pour déterminer le risque de formation de condensation, la température du point de rosée calculée doit être comparée à celle de la surface du support. Cette dernière doit être plus élevée que la température du point de rosée d'au moins 3 °C.

## 8.2 Matériaux FRP de S&P

Les matériaux FRP de chez S&P (lamelles, sheets, colles) sont soumis à un contrôle qualité continu (ISO 9001). Les fiches techniques contiennent les informations sur les valeurs caractéristiques des produits. Des instructions de mise en oeuvre sont à disposition pour la pose de systèmes FRP de chez S&P. S&P propose annuellement – ou sur demande – des cours pratiques à l'intention des ingénieurs civils et des applicateurs.

Les fiches techniques sont à disposition sur www.sp-reinforcement.eu.





## 8.3 Contrôles d‘exécution

Divers protocoles sont à disposition des utilisateurs des systèmes S&P pour le suivi qualité lors de l’exécution. Les diverses valeurs obtenues peuvent ainsi être répertoriées et classées.

### 8.3.1 Colle

Pour tester la colle, on réalisera chaque jour au moins deux prismes de colle de 40 x 40 x 160mm. Ces éprouvettes permettront de déterminer la résistance à la traction par flexion et le module d’élasticité. Si la charge de colle change, on confectionnera et testera des prismes supplémentaires.

### 8.3.2 Liaison FRP, colle et béton

La qualité de la liaison du FRP sur son support revêt une très grande importance. La liaison peut à son tour être testée par des essais de résistance à la traction.
En règle générale, des lamelles d’essai sont collées spécialement pour ces tests. Généralement, la rupture a lieu dans le support.

Cette méthode permet de tester le comportement à long terme. Dans la construction de ponts par exemple, il est possible de réaliser un essai de résistance à la traction tous les 10 ans.

### 8.3.3 Contrôle des vides dans la colle et entre la colle et le support

Après séchage de la colle, le FRP sera contrôlé au maillet par légère percussion pour détecter les vides (bruit).

- Les vides situés en zone médiane du FRP seront remplis avec de la résine injectée à faible pression.
- Pour des vides situés dans les zones d’ancrages du FRP (extrémités des lamelles) les renforcements FRP seront éliminés et remplacés.

## 8.4 Sécurité au travail

Pour l’application des systèmes S&P veuillez suivre les informations et procédures décrites dans les fiches de sécurité et les guides d’application (publiés sur www.sp-reinforcement.eu).

Les résines époxy peuvent provoquer des irritations de la peau. Par conséquent, nous recommandons l’utilisation systématique de :

- Protection pour la tête
- Lunettes de sécurité avec protections latérales conforme à l’EN 166
- Vêtements de protection à manches longues
- Gants de protection conformes à EN 374
- Chaussures fermées

Il faut prendre en considération les mesures relatives au comportement à adopter en cas de danger, aux premiers secours et à une élimination appropriée des déchets, etc..





## 8.5 Références

Au cours de plus de vingt années d’expériance en Recherche et Développement, S&P a effectué de nombreux essais et tests de ses matériaux. Les documents et résultats correspondants sont consultables dans leur intégralité auprès de S&P Suisse.



